高精度破面観察手法の開発と特性化への応用

東京大学工学系研究科　酒井 信介，泉 聡志，姜 軍，山際 謙太

1. 緒言

近年，重大事故の原因解明においてフラクトグラフィが用いられ，その価値が改めて再認識されている．しかしながら，フラクトグラフィは熟練した技術者・研究者の経験による判断に依存することが多く，定性的な側面を持つため，特に重要な判断を伴う場合にはリスクが伴うと考えられる．また，近年，熟練者の不足も問題となってきている．破面の定量的な評価を行うためには，高精度な破面観察技術と，有効な特性化手法が必要である．

前者に対しては，近年，三次元情報と高分解能情報において，走査型トンネル顕微鏡（STM）や原子間力顕微鏡(AFM)，走査電子顕微鏡（SEM）[(1)(2)]を用いた研究が盛んに行われている．後者に対しては，荒さや周期性（FFT），パターン認識，フラクタル次元などによる特性化の研究が盛んに行われている．特性化の高精度化においては，高精度な破面観察技術が不可欠であり，両者は相補的に発展するものと考えられる．

本研究では，高精度な破面観察手法の提案を行い，特性化への応用を行う．具体的には，SEM 像に対する三次元解析において，従来の二次電子の放出特性を利用した角度検出の二次電子信号積分法[(3)-(5)]及びステレオマッチング観察法[(6)-(9)]の欠点を補い，両者を融合した新たな三次元解析アルゴリズムを開発する．また，より広範囲における高分解能の二次元情報を得るため，試験片切断し，断面を観察する手法も試みる．

次に，得られた高精度な破面情報を用い，フラクタル解析による特性化を行う．これまでのフラクタル解析は，破壊破面一つに対して単一のフラクタル次元を求め，性質の違いを論じるものが多くあった．信号解析の分野等においては，このような解析方法は有効であると考えられるが，少なくとも破面解析においては，破面全体の性質よりむしろ，例えば，荷重変化や破壊形態（脆性ー延性）に伴う遷移部分の局所的な性質が必要とされる場合が多い．そこで，本論文においては，破面の局所的なフラクタル特性により，従来のフラクタル解析より格段に情報量を増やした局所フラクタル解析を行う手法を提案する．また，従来はフラクタル特性の算出において，Box-Counting 法などの自己相似(Self-Similar)な性質を求める手法が多く用いられてきた．しかしながら，破面は信号解析・地形・フラクタル図形などとは異なり，縦横比（面積に対する凹凸の比）が小さく(1/10 以下)，このような自己相似の性質は本質的に持ち合わせていない．そこで，通常は高さ（たて）方向の数字を数百～数千倍して，自己相似を論じることが行われている[(10)]が，高さ方向の拡大の物理的根拠に乏しい．著者らは，破面は自己相似より，むしろ異方的な相似性を示す自己アフィン[(11)]で表現すべきであると考え，自己アフィンの指標である Hurst 数（指数）をフラクタル特性の指標として用いることとした．

2．高精度破面観察手法の開発

2・1　二次電子信号積分法とステレオマッチング法と組合せた新たなアルゴリズムの提案[(16)]　本研究においては，一方で二次電子信号積分法による高さデータを得，他方で主画像と傾斜画像の一対の画像からステレオ解析法による高さを解析し，両者を融合して，上記の両者の欠点を補い合う新たな三次元解析アルゴリズムを提案する．原理としては，二次電子信号放出特性を用いて検出された有効な角度を利用し，ステレオマッチング法で計算された高さデータを補正し，マッチングの離散化誤差を減らすものである．

図 1 は提案法で高さを求める原理図を示す．周辺四点の解析点の情報から中央の点(i, j)の高さを解析する場合について説明する．$H_m(\ )$はマッチング法により解析された高さであることを示す．マッチング法解析のためには，解析点よりも 8 倍以上密度の画素数を用いるが，図が複雑になるのを防ぐため，図上には表示していない．$H_m(i, j)$は傾斜角度に応じた離散化誤差を内在している．そこで，平行して二次電子信号強度の角度検出で評価している傾斜角度 θ_s(即ち $\theta_s(i, j-1)$, $\theta_s(i-1, j)$, $\theta_s(i, j+1)$, $\theta_s(i-1, j)$)の計算値を用いて，

精度の改善をすることを考える．ただし，θ_sは式（1）に基づき，リアルタイムに評価される傾斜角度である．例えば，点$(i, j-1)$のマッチング高さ$H_m(i, j-1)$と$\theta_s(i, j-1)$情報から(i, j)点の高さを次式により予測できる．

$$H(i,j)=H_m(i,j-1)+mesh\times\tan(\theta_s(i,j-1)) \quad \cdots\cdots(1)$$

ここでmeshは解析点の間隔である．同様にして，他の三つの解析点からも(i, j)点の高さ$H(i, j)$を評価できる．これらの4個の評価量は原理的には$H_m(i, j)$と一致するはずであるが，次の二つの誤差要因があるので一致するとは限らない：(1) 表面の入射角度θ＞65度の場合に，図1に示した通りθ_sが誤差を持つこと．(2) 周辺4点のマッチング解析値H_mにも，$H_m(i, j)$同様に離散化誤差が含まれていること．これらの誤差要因を，以下の方法で排除することを考え，測定精度の向上を目指す．

まず（1）については，H_mの計算値から角度θ_m（即ち$\theta_m(i,j-1)$, $\theta_m(i-1,j)$, $\theta_m(i,j+1)$, $\theta_m(i+1,j)$）を概算評価し，θ_m＜65度を満たす場合についてのみθ_sが有効であるものとして式（3）の評価を行う．次に（2）の誤差要因については，誤差が打ち消し合うよう平均化を行う．ただし，θ_mについて有効と判断された有効点についてのみ平均対象に加えるものとする．この二つの処理によって，高さの評価は$H_m(i, j)$よりは誤差が減少することが期待できる．具体的に式で記述すると，θ_m＜65度を満たし，周辺四点の情報を用いて$H_m(i, j)$を補正した高さ$H(i, j)$は，

$$\begin{aligned}H(i,j)=&\frac{1}{5}(H_m(i,j)\\&+H_m(i,j-1)+mesh\times\tan(\theta_s(i,j-1))\\&+H_m(i,j+1)+mesh\times\tan(\theta_s(i,j+1))\\&+H_m(i-1,j)+mesh\times\tan(\theta_s(i-1,j))\\&+H_m(i+1,j)+mesh\times\tan(\theta_s(i+1,j)))\end{aligned} \quad \cdots\cdots(2)$$

ただし，θ_m＞65度の点が周辺4点の中に含まれる時にはその点は無効点とする．例えば，$(i, j-1)$点無効点である場合には，この点を除外して，次式の平均化により高さ評価を行う．

$$\begin{aligned}H(i,j)=&\frac{1}{4}(H_m(i,j)\\&+H_m(i,j+1)+mesh\times\tan(\theta_s(i,j+1))\\&+H_m(i-1,j)+mesh\times\tan(\theta_s(i-1,j))\\&+H_m(i+1,j)+mesh\times\tan(\theta_s(i+1,j)))\end{aligned} \quad \cdots\cdots(3)$$

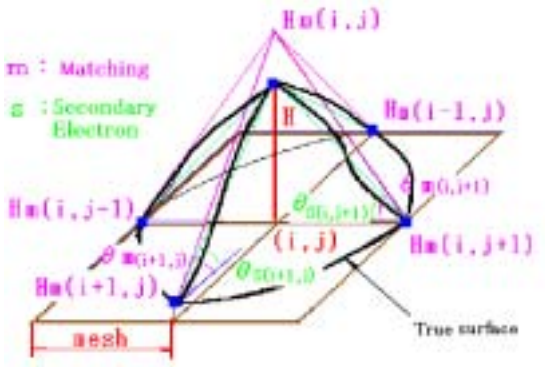


Fig. 1. Illustration of calculation for 3 dimensional profile. Point (*i*, *j*) is not only the position of reconstructed point by stereo matching but also the position of point measured by integration of secondary electron intensity.

この補正処理の操作を全解析点に実施した後，更にステレオマッチングの離散化誤差を減ずる為に全解析点に対して同様な補正処理を実施する．

ミスマッチングを最小限に抑えるよう，ステレオマッチング法はテンプレートサイズを可変とする高速化アルゴリズムを用いた．詳しい内容は文献[12]を参照されたい．

2・2 切断面観察による二次元プロファイルの取得[17] 破面の局所的な特性を見るためには，プロファイル長（データ数）は出来るだけ長くする必要がある．三次元走査型電子顕微鏡で直接測定できるデータ長は数百程度であり，必ずしも十分とは言えない．そこで，試験片を切断し，側面から高低を観察する手法を試みた[13]．具体的には，先ず試験片を樹脂に埋め込み，研磨により断面を露出させた．次に断面形状を走査型電子顕微鏡(エリオニクス社製 ERA-4000)により，倍率2000倍で写真撮影を行う．撮影した写真100枚をスキャナーにより300dpiでビットマップ化し，PC上でつなぎ合わせる．境界の判定は，画像処理によりピクセル値のヒストグラムを作成し，写真の金属部分を白，金属部分外を黒に変換する2値化により行った（図2参照）．画像処理ソフトにはMEDIA CYBERNETCS社製のImage-Pro PLUS. ver.3.0 for Windowsを用いた．これらの作業により，データ点数5万程度のプロファイルを作成出来た．実際の解析においては計算速度を考慮して，データ点数2^{14}=16384となるように間引きを行った．

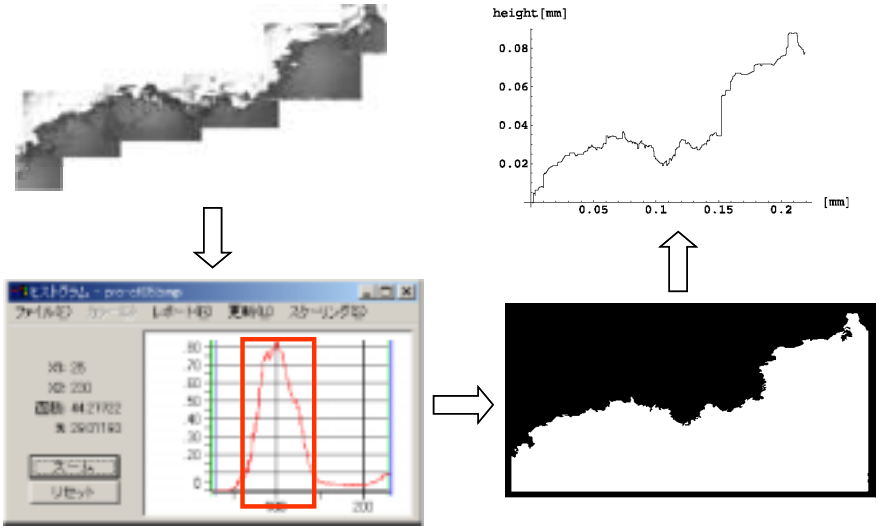


Fig.2　断面切断観察による破面プロファイルの取得（左上，SEM による観察写真，左下）

３．局所フラクタル次元(Hurst 数)の数値算出法の提案[17]

異方的なフラクタル次元である Hurst 数の局所量を算出する手法について述べる．等方的に縮尺を変化させた時に自己相似になるものを，自己相似フラクタルというが，異方的変化により相似になるものを自己アフィンフラクタルと呼ぶ．つまり，プロファイル $h(x)$があるとき $x \to \lambda x$ という変換を行なった時，式(4)の関係が成り立つものを自己アフィンフラクタルという．H を Hurst 数と呼ぶ．

$$h(x) \cong \lambda^{-H} h(\lambda x) \quad \cdots\cdots (4)$$

二次元のプロファイルが局所においても自己アフィンであると仮定し，プロファイル $h(x)$の任意の場所における Hurst 数を算出する方法について述べる．プロファイル $h(x)$において，式(4)より x_0近傍においても，

$$h_{x_0}(x) = h(x_0 + x) - h(x_0), \qquad h_{x_0}(x) \cong \lambda^{-H} h_{x_0}(x) \quad \cdots\cdots (5)$$

が成り立つとし，両辺をウェーブレット変換 $W[f(x)]$[14]すると式(6)が得られる．

$$W[h_{x_0}(x)](b,a) = \lambda^{H+1/2} W[h_{x_0}(x)](\lambda b, \lambda a) \quad \cdots\cdots (6)$$

ここで，ウェーブレット変換 $W[f(x)]$ とは式(7)で定義される変換のことである．

$$W[f(x)](b,a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x)dx \quad \cdots\cdots (7)$$

$\psi(x)$ はマザー・ウェーブレット，またはアナライジング・ウェーブレットといい，局在化した関数であり，信号を切り出す時の単位として使うものである．a はスケール，b は位置のパラメータである．ウェーブレット $\psi((x-b)/a)$ はマザー・ウェーブレット $\psi(x)$ を b トランスレート(平行移動)し，a スケール(伸縮)したものである．つまり，これにより，もとの信号や波形の局所的な相似構造を調べることが可能になる．これらの式を変換すると，x_0近傍において，式(8)のようにスケール a を変えることによってべき乗則が成り立つ．

$$W[h(x)](b + x_0, a) = \lambda^{H+1/2} W[h(x)](\lambda b + x_0, \lambda a) \quad \cdots\cdots (8)$$

したがって，任意の位置 x_0 において，スケール a とウェーブレット変換 $W[h](x_0, a)$ の両対数をプロットすると，その直線の傾きが $H+1/2$ となり任意の位置 x_0 における局所的な Hurst 数を算出が可能になる．実際のプロファイルは離散的なデータであるため，解析には，離散ウェーブレット変換を用いた．マザーウェーブレットには 4 階のカーディナル B スプラインウェーブレットを用いた．解析ソフト MATHEMATICA, ver3.0(Wolfram Research 社)を用いた．プロファイルの境界については自由境界条件とした．境界の影響を受けたと考えられる端部領域については結果より切り捨てた．対数プロットからの Hurst 数算出には最小二乗法を用いた．また，求めた Hurst 数は非常に揺らぎが大きいため，位置 j における局所的 Hurst 数を算出するために，第 j 番目の点の左右 n 個目の点までのウェーブレット係数の絶対値（ウェーブレットエネルギに対応$|W[h]|$を総和することにより平均化を行なった．

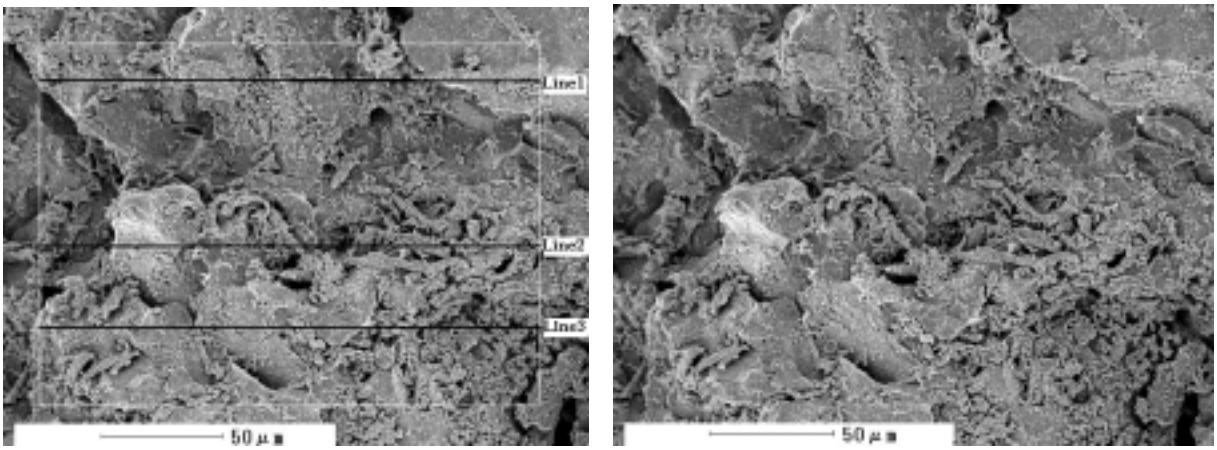
$$\overline{W}(j,a) = \sum_{i=j-n}^{j+n} |W[h](i,a)| \quad \cdots\cdots (8)$$

その和 $\overline{W}(j,a)$ と a を両対数にプロットし，最小二乗近似直線の傾きを求め，第 j 番目の点の Hurst 数とした．平均の幅を何通りか変化させ，誤差(ここでは最小二乗近似直線とのずれの絶対値の平均とした)が飽和する幅(データ数 1000)を平均の幅として採用した．これにより，最小二乗法による誤差は 0.736 から 0.080 にまで減少した．上にも述べた通り，これらの幅の取り方は，局所量を優先するかゆらぎの抑制を優先するかについて任意性があるため，目的に応じて調整すべきである．平均化した Hurst 数を新たに局所 Hurst 数と呼ぶこととする．

4．破面観察結果

4・1　二次電子信号積分法とステレオマッチング法と組合せたアルゴリズムの結果[16]　電子線三次元粗さ解析装置（Elionix 社の ERA-8800）で観察した．試験片の材料は JIS G3106 溶接構造用圧延鋼材[15]を用いた．衝撃試験で破壊した延性破面を 500 倍で観察した．０度の画像と 5 度傾斜した画像を撮影した．256 階調のデジタル画像に取り込んだ，画像の様子を図 3 に示す．画像分解能は 1200×900 である．ステレオマッチング法は図中の白線内について適用した．図 4 は二次電子信号角度検出の積分法での測定した結果の鳥瞰図．図 5 はテンプレートサイズを可変とするステレオマッチング法[10]を適用した結果の鳥瞰図である．この際，テンプレートサイズ 51×51～7×7 まで変動させた．図 6 は提案法の結果で，130×90 点について再構築する計算時間は 64M メモリ，245M CPU の SUN　Workstation で 6 分であり，充分実用的である．高さデータの表示にあたり，全データの中の最低点を０とし，この値に対する相対高さで表示することとする．すべての高さデータは AVS システムにより表示した．図 6 と図 4，図 5 と比較して，図 4 の二次電子信号積分法の 3 次元測定結果は緩やかになってしまう．最高点の位置 A はステレオマッチングの結果と同じであるが，図 6 の最低点 B の位置は左側にあり，図 4 の最低点 B の位置は右下にある．写真と対照して，破面の右側は粒界のところで，凹凸が激しいため，積分法は正確な輪郭傾斜角度を得られず，表示できない．ステレオマッチングの分解能の制約があるため図 5 はギザギザになっている．一方，提案法の結果は連続的であり，より実際の破面形状に合うと考えられる．

図 7，図 8，図 9 は各々主画像図 3 中の黒ライン Line 1，Line 2，Line 3 上の断面を示す．SEM 二次電子信号積分法により測定した結果と，ステレオマッチング法及び提案法により測定結果を重ねて表示した．図 7 において，提案した測定法と SEM 二次電子信号積分法の測定結果を比べると，計算開始点では両者とも一致している．しかし，二次電子信号積分法によるの測定高さは傾斜角度 70 度以上である粒界部分 1，2 を通過した後に，大きな誤差が発生し，緩やかにしか表示できていない．この結果，それ以降の高さデータに累積誤差として残ってしまう．一方，提案法はその欠点がなく，粒界部分も明瞭に判断できている．図 8 も同様である．図 8 には Line 2 の一部の拡大図もあわせて示す．図中の“ Smoothing ”は，ステレオマッチングの結果について，周辺四点の平滑化により評価した結果である．ステレオマッチング法の結果は離散化誤差を含むため，連続的表示には限界がある．このような離散化は，平滑化によってある程度解消することができるが，図中の平滑化の結果から明らかな通り，破面の詳細な特徴が失われてしまう．一方，提案法にはこれらの欠点がない．図 9 においては，開始点近くの粒界部を除いて，二次電子信号積分法による測定結果と提案法での結果はほぼ平行となっていることから，激しい凹凸変化がない限り，両者の結果は比較的よく一致するものと考えられる．



(a) Source Image　　(b) Oblique Image

Fig. 3 SEM image of fracture surface on Charpy specimen of SM400B (Size: 1200×900)

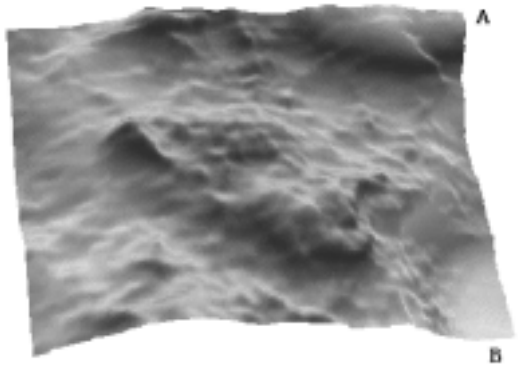


Fig. 4 Surface profile measured by integrating secondary electron signals

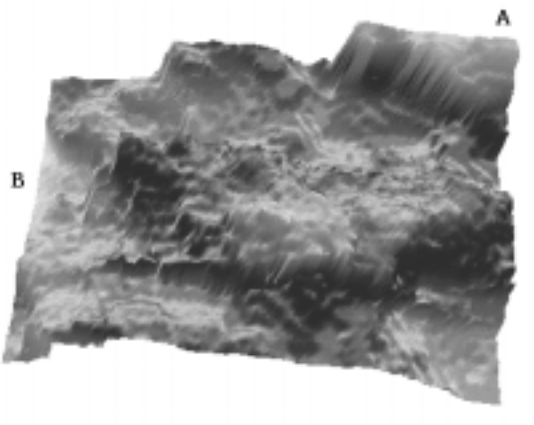


Fig. 6 Reconstructed fracture surface profile by proposed method

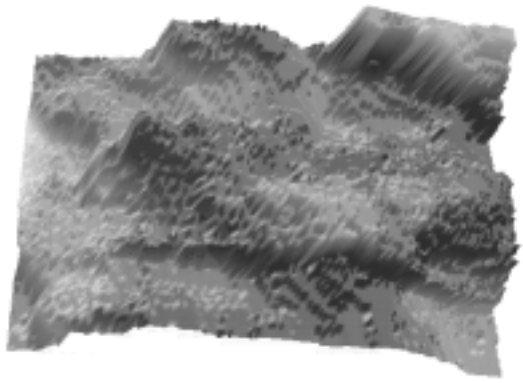


Fig.5 Reconstructed fracture surface profile with stereo matching

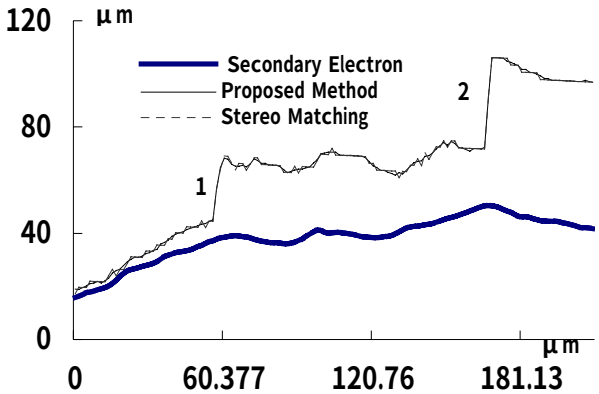


Fig.7 Profile height of Line 1 in Fig.3 measured by different methods

4・2　切断面観察による二次元プロファイルの結果[17]　試験片は 4･1 と同様である[15]．得られた解析のためのプロファイルをシャルピー試験について図 10 に示す．き裂進展方向は，図中左から右の方向である．また，図 11 には，それぞれの破面観察写真とともに，二次元断面プロファイル作成位置(断面切断位置と観察範囲)を示す．

図 10 中に示す矢印部(約 1.6mm 地点)が目視の破面観察により，おおよそ延性-脆性遷移の境界であると考えられる位置である．矢印部(約 1.6mm 地点)より左側が延性部，右側が脆性部と考えられる．

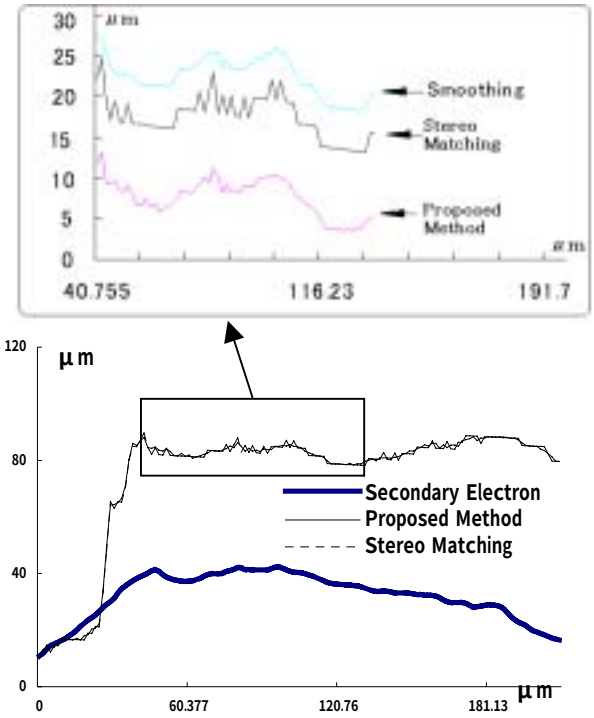


Fig.8 The lower figure is measured profile height of Line 2. The upper figure is the part of Line 2 from 40 μm to 120 μm. calculated by different methods.

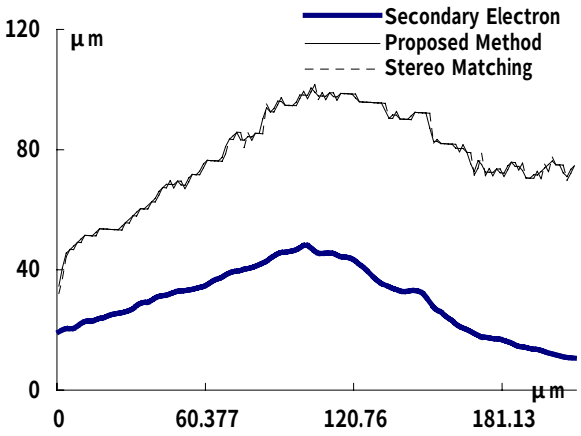


Fig.9 Measured Profile Height of Line 3 in Fig. 3

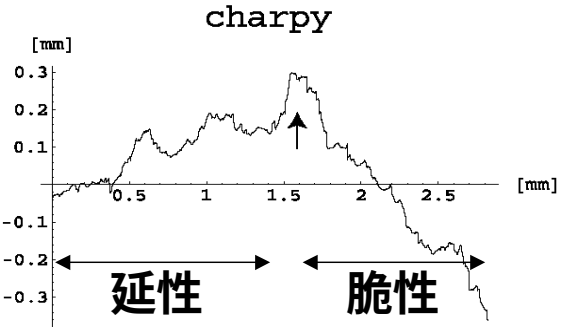


Fig. 10 The profile of Charpy fracture surface

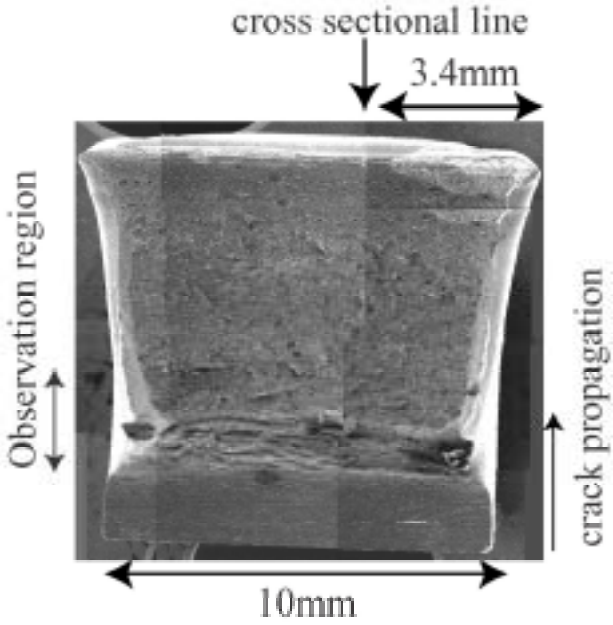


Fig. 11 The picture of the fracture surface

Fig.12 The distribution of local Hurst exponent

５．フラクタル解析結果[17]

局所 Hurst 数算出には，少なくとも 1000 以上のデータが必要なため，切断面観察によるプロファイルを用いた．図 10 について，局所 Hurst 数を求めた結果を図 12 に示す．また，参考のため，局所 Hurst 数算出の際の平均の幅を広げて，破面全体及び脆性・延性部の Hurst 数も算出した．結果，延性-脆性遷移を含む全体が 0.82(誤差：0.06)，延性部と考えられる部分（左側）を抽出したプロファイルが 0.76(0.07)，脆性部と考えられる部分（右側）を抽出し作成したプロファイルが 0.85(0.06)となった．この値は，図 12 の延性部の平均値と，脆性部の平均値とほぼ対応している．ここで(　)内の数字は平均誤差である．図 12 の結果から局所 Hurst 数は延性破面と考えられる図中左半分では，ゆらぎながらほぼ一定の値(0.76)を保ち，脆性破面と考えられる右半分では小さくゆらぎながら，き裂進展に伴い上昇していることがわかる．局所 Hurst 数の傾向の変化により，脆性-延性遷移部は図中 1.6～1.7mm の地点であると考えられる．これは目視による観察の結果（図 10 中の矢印部）とほぼ一致することから，脆性部と延性部の破面のフラクタル性の違いが明らかになり，境界の定量的な同定が可能になったものと考えられる．また，本解析では，脆性部についてはデータ取得領域が足りず，フラクタル次元が収束する領域までの解析が出来なかった．データの取得方法の効率化を計り，さらに広範囲の領域の解析を行う必要があると考えられるが，少なくとも，本論文においては境界の同定は可能になったものと考えられる．

5．結言

1．二次電子から評価された角度情報とステレオ解析とを融合して両者の欠点を補い合う新たな三次元解析アルゴリズムを提案した．
2．シャルピー衝撃破断面の SEM 像に対して提案法の適用した結果，ステレオマッチング法の離散化に伴う誤差を解消でき，尚且つ急傾斜部においてもプロファイルの解析が可能であることを示した．
3．フラクトグラフィの数値解析法として，破面の局所的なフラクタル特性をウェーブレット変換を用いて求める手法と破面が本質的に自己相似よりもむしろ自己アフィン性を持つと考えた自己アフィンフラクタル次元（Hurst 数）による評価法を提案した．
4．提案した手法を人工的に作成したプロファイルで検証を行った後に，実破面へと適用し，シャルピー試験破面の延性-脆性遷移の境界を示し，本論文で提案した手法が，破面内の破壊機構の遷移もしくは遷移の有無を検出できることを示した．

謝辞　本研究の一部は日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業（９７Ｒ１２０１）の助成の下で行った。ここに謝意を表する。

文　献

(1)　小寺沢良一編著，”フラクトグラフィとその応用”，日刊工業新聞社（1981）
(2)　材料，講座「フラクトグラフィと破壊力学」，12 回連載，Vol.29,99;198;33;413;517;634;754;855;948;1059;1147;1247(1980)
(3)　村田雅人・向井喜彦・田口佳男・堀田昌直，溶接学会論文集, **3**,(1991),134-138
(4)　株式会社エリオニクス ERA－4000 電子線三次元粗さ解析装置取扱説明書；
(5)　Tadao Suganuma, J. Electron Microscope, **34**-4, 328-337, (1985)
(6)　駒井謙治郎，鉄と鋼, (1986;), , 2125－2132
(7)　駒井謙次郎，構造材料の環境強度設計，養賢堂, (1993), 40－73
(8)　酒井信介・荻原 聡・岡村弘之・高野太刀雄，圧力技術，**21-6**，282 (1983).
(9)　高木幹雄（監修）, 画像解析ハンドブック,東大出版会, (1991), 707‐722
(10)　Schmittbuhl, J. Vilotte, S. Roux,　Phys. Rev. E,　**51**, (1995), 131—147
(11)　マンフレッド・シュレーダー著, 竹迫一雄訳, フラクタル・カオス・パワー則, (1997), 197-222, 森林出版
(12)　姜軍・酒井信介，材料，**50**，1176-1180 (2001)；
(13)　A. Delaplace, J. Schmittbuhl, K. Maloy, Phys. Rev. E, **60**, (1999), 1337—1343
(14)　榊原 進, ウェーブレットビギナーズガイド, (1995), 東京電機大学出版会
(15)　機械工学実験編集委員会，機械工学実験, (1984), 308-312, 東京大学出版会
(16)　姜軍・酒井信介，機論，掲載予定
(17)　泉　聡志・橘鷹　伴幸・原　祥太郎・酒井　信介，機論，掲載予定